

Etude expérimentale et numérique des transferts thermique et hygrique dans une paroi en briques de terre crue compressée

Sara Chehade¹, Nicolas Dujardin¹, David Giovannacci², Abderrahim Boudenne¹

¹ Univ Paris Est Créteil, CERTES, F-94010, Créteil, France.

² Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 Rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France.

RESUME Cette étude analyse, à la fois de manière expérimentale et numérique, la performance hygrothermique d'un mur construit en Briques de Terre crue Compressée (BTC), soumis à différentes conditions thermiques et hygriques. L'objectif est d'évaluer la capacité de la terre crue non stabilisée à réguler la température et l'humidité à l'intérieur d'un bâtiment. Un dispositif bi-climatique a été mis en place pour soumettre la surface extérieure du mur en BTC à des variations contrôlées de température et d'humidité, tandis que la surface intérieure reste maintenue à 20°C avec une humidité relative comprise entre 30 % et 50 %. Les fluctuations de température et d'humidité ont été mesurées à l'aide de capteurs placés à différentes profondeurs dans la paroi. Un modèle numérique basé sur l'approche de Kunzel a été appliqué et les résultats des simulations ont été comparés aux données expérimentales. Les résultats montrent que le modèle est capable de prédire avec précision les variations de température et d'humidité au sein de la paroi en BTC. De plus, cette dernière se révèle efficace pour atténuer les fluctuations thermiques et hygriques, induisant un transfert de pression de vapeur et un gradient de chaleur simultanément.

Mots-clefs brique terre crue, propriétés hygrothermiques, étude expérimentale, modèle numérique, confort intérieur, transfert de chaleur et d'humidité.

I. INTRODUCTION

Dans l'industrie de la construction, les facteurs au-delà de la capacité portante des matériaux sont jugés importants. Aujourd'hui, de nombreux aspects essentiels doivent être pris en compte lors du choix des matériaux de construction. Tout d'abord, il faut considérer l'empreinte carbone de ces matériaux et leur capacité à réduire la consommation énergétique du bâtiment. Utiliser des matériaux avec une faible empreinte carbone et des propriétés hygrothermiques durables est essentiel pour réduire la dépendance aux systèmes de refroidissement et de chauffage. Dans cette perspective, la terre crue a gagné en reconnaissance comme un matériau de construction durable. Étant donné sa forte capacité à réguler la température et l'humidité (Ashour et al., 2015; McGregor et al., 2014), étudier et comprendre comment la terre crue contrôle le climat intérieur d'un bâtiment dans des situations réelles semble nécessaire. Ce travail souligne l'importance de fournir une meilleure compréhension de l'efficacité hygrothermique des murs intérieurs en Briques de Terre crue Compressée (BTC). Le processus de transfert couplé dans les parois reste difficile à évaluer. Les variations d'humidité au sein des matériaux affectent leurs propriétés thermiques (Chehade et al., 2024). Il en va de même pour les variations de température, qui influencent à leur tour le pouvoir d'absorption des matériaux (Asli, 2017). Cela met en évidence que pour certains matériaux, le transfert thermique peut s'accompagner d'un transfert de masse

notamment sous forme de vapeur d'eau. L'objectif est ici de mettre en évidence le transfert couplé de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi. Hema *et al.* (Hema *et al.*, 2021, 2020) ont étudié l'impact de la conception des murs BTC sur l'efficacité thermique. Leur étude a montré que les murs à double couche améliorent les conditions climatiques intérieures en améliorant le confort thermique et en évitant les surchauffes dans les bâtiments résidentiels. Belarbi *et al.* (Belarbi *et al.*, 2024) ont évalué la performance énergétique de murs en torchis monocouche et multicouche, démontrant leur capacité à réduire de manière significative la demande de chauffage dans les climats froids et les besoins en climatisation dans les régions plus chaudes. Ils ont expliqué que la prise en compte du transfert de masse en plus du transfert de chaleur influence l'estimation des besoins énergétiques des bâtiments. De plus, Giuffrida *et al.* (Giuffrida *et al.*, 2024) ont comparé deux murs isolés en BTC, l'un avec une bagasse de canne à sucre épaisse et l'autre avec une isolation en chaux et chanvre. Ils ont constaté que la résistance thermique était neuf fois plus élevée dans le premier cas et quatre fois plus élevée dans le second par rapport aux murs BTC non isolés.

L'un des principaux obstacles à l'intégration de la terre crue dans les constructions courantes est l'absence de normes internationalement reconnues pour l'évaluation des performances hygrothermiques et de la durabilité. Cette étude vise à fournir des informations sur le comportement hygrothermique d'un mur en briques de terre crue compressée, afin d'évaluer plus précisément sa capacité à maintenir le confort thermique intérieur et à réguler les niveaux d'humidité dans des conditions réelles. Pour ce faire, le mur en BTC conçu au sein du laboratoire est soumis à un environnement bi-climatique, et son comportement thermique et hygrique est analysé. De plus, un modèle numérique basé sur l'approche de Kunzel a été utilisé pour prédire la réponse hygrothermique de ce mur.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Les briques étudiées proviennent d'une briqueterie du nord de la France, dont la terre est extraite de la ville d'Allonne, dans le département de l'Oise (Picardie, France). La terre a été broyée et mélangée avec de l'eau pour atteindre sa limite plastique, sans inclure de stabilisateur, avant d'être versée dans une presse mécanique et comprimée dans un moule de $22 \times 10 \times 6 \text{ cm}^3$. Les briques ont ensuite été laissées à sécher à l'air libre pendant l'été. Les BTC ont une porosité de 29,5 % et une masse volumique de $1868 \pm 6 \text{ kg.m}^{-3}$. Le mortier, fourni en vrac par la même briqueterie, présente les mêmes propriétés que les BTC et est utilisé comme joint pour le mur. Le [Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#) résume les propriétés thermiques et hygriques de la brique. Il présente les valeurs des paramètres d'entrée utilisés dans le modèle numérique. Les paramètres comprennent l'isotherme de sorption avec son coefficient de conduction liquide correspondant ($D_{l,\varphi}$) et le coefficient de transport capillaire pour le processus d'aspiration ($D_{l,ws}$).

TABLEAU 1. Paramètres d'entrée pour le modèle numérique.

Propriétés	Valeurs
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	1868 ± 6
Porosité ε (-)	0,29
Chaleur spécifique C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	820 ± 8
Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1,03 ± 0,03
Facteur de résistance de diffusion à 0 % HR μ (-)	29,10 ± 0,10
Facteur de résistance de diffusion à 75 % HR μ^* (-)	14,40 ± 0,10
Teneur à la vapeur d'eau à 90 % HR	4,4 %
Diffusivité liquide par saturation libre D_{wf} (m ² .s ⁻¹)	3,57 × 10 ⁻⁸
Diffusivité liquide par teneur en eau de référence D_{w0} (m ² .s ⁻¹)	2 × 10 ⁻¹⁰
Coefficient d'absorption capillaire a (kg.m ⁻² .s ^{-0.5})	0,17
Teneur en humidité capillaire W_f (kg.m ⁻³)	135,20

B. Préparation de la paroi

Les BTC et le mortier ont été utilisés pour construire un mur test de 50 × 50 × 10 cm³, comme le montre la [Figure 1](#). Le mur a séché pendant deux mois au laboratoire (20°C et 30 – 50 % HR). Au centre de la face intérieure du mur, nous avons percé trois trous dans les briques à diverses profondeurs avec une précision de 0,1 mm. Les diamètres des trous étaient parfaitement adaptés pour accueillir les sondes (8 mm de diamètre) à l'intérieur du mur pour surveiller l'évolution de la température et de l'humidité relative (HR). Les capteurs de température et d'humidité (MSR 145B, TH industry avec une précision de ± 0,2°C et ± 2 % HR) ont été installés à différentes profondeurs du mur, plus précisément à 0 cm, 2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm et 10 cm en partant de la face extérieure. Deux sondes supplémentaires ont été placées dans les environnements extérieur et intérieur. Les quatre faces latérales de la paroi en BTC ont été recouvertes de polystyrène expansé pour un transfert thermique unidirectionnel ([Figure 1](#)).

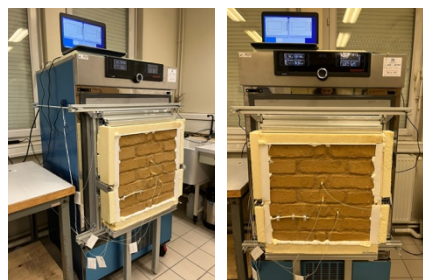


Figure 1. Paroi en terre crue dans la chambre climatique.

C. Installation expérimentale bi-climatique

L'une des deux faces du mur a été positionnée dans une chambre climatique et l'autre était en contact avec l'environnement interne du laboratoire. Cela permet de créer deux conditions environnementales distinctes, exposant les deux faces du mur à différentes conditions

hygrothermiques. La chambre climatique permet de simuler les conditions extérieures du mur en appliquant deux scénarios (Figure 2), tandis que l'environnement du laboratoire représente les conditions hygrothermiques intérieures. Les conditions hygrothermiques à l'intérieur du laboratoire étaient régulées par la climatisation (à 20°C et 30-50 % HR). Les deux scénarios thermiques et hygriques utilisés sont les suivants :

- Une canicule estivale, caractérisée par une vague de chaleur, où la température a été maintenue à 20°C pendant 12 heures pour simuler la nuit, puis augmentée à 40°C pendant 12 heures pour simuler le jour. Ce cycle a été répété pendant 7 jours. L'humidité relative a été maintenue à 50 %.
- Un cycle de variation de l'humidité au cours duquel le mur a été soumis à 20 jours de faible humidité (20 % HR), suivis de 20 jours à 80 % HR. La température a été maintenue à 20°C pendant toute la durée du cycle. Ce cycle a été répété deux fois.

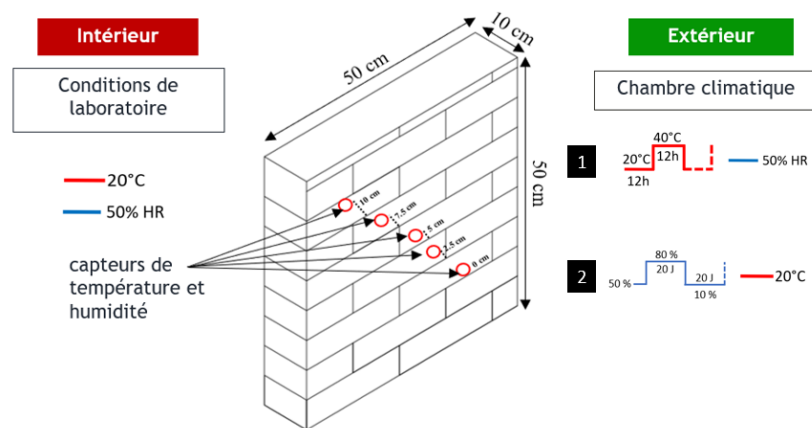


Figure 2. Etudes des scénarios appliqués sur le mur de BTC.

D. Modèle numérique

Plusieurs modèles ont été développés pour décrire mathématiquement le transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction et les milieux poreux. Les prédictions de ces modèles de transfert sont basées sur diverses théories qui prennent en compte différents potentiels de conduite principaux (Dujardin et al., 2024) : la teneur en humidité (Philip de Vries, Whitaker, Mendes), la pression capillaire (Pedersen, Luikov) et l'humidité relative (Künzel, Liu). De nombreuses études (Alioua et al., 2019; Bart et al., 2014) ont validé ces approches, qui sont largement utilisées pour prédire le transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux. Mendes et al. (Mendes et al., 2003) ont mené une analyse de sensibilité basée sur la théorie de Philip et de Vries et ont constaté que négliger le transfert d'humidité conduit à une sous-estimation de 59 % du flux de chaleur. De même, Maalouf et al. (Maalouf et al., 2014) ont réalisé une analyse de sensibilité montrant que les propriétés hygriques sont les paramètres les plus influents. Alioua et al. (Alioua et al., 2021) ont également évalué le modèle de Künzel pour un mur en béton de palmier dattier. Ils ont constaté que le transfert de chaleur est significativement affecté par les variations de capacité thermique et de masse volumique. Pour le transfert d'humidité, les principaux facteurs influençant sont l'isotherme de sorption et les facteurs de résistance à la vapeur.

Le modèle de Künzel (Künzel, 1995) a été utilisé dans cette étude pour décrire le transfert couplé de chaleur et d'humidité, avec l'HR comme force motrice principale. Le transfert d'eau est régi par

la diffusion, suivant la loi de Fick, tandis que le transfert de chaleur est influencé par la conduction, le flux d'enthalpie, le rayonnement solaire à ondes courtes et le refroidissement radiatif à ondes longues. Le transfert d'humidité suit :

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_{l,\varphi} \nabla \varphi + \delta \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (1)$$

Où $dw/d\varphi$ est la capacité de stockage de l'humidité, $D_{l,\varphi}$ est le coefficient de conduction du liquide, δ_p représente la perméabilité à la vapeur d'eau, φ est l'humidité relative, p_{sat} est la pression de saturation de la vapeur d'eau et w est la teneur en eau.

Transfert de chaleur :

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla(\delta \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (2)$$

Où dH/dT est la capacité de stockage de chaleur, λ est la conductivité thermique, h_v est l'enthalpie d'évaporation de l'eau, T est la température.

Ce modèle prend en compte les modes de transfert suivants : la conduction thermique, la chaleur à changement de phase et la diffusion d'eau liquide et de vapeur dans le transfert de masse. Les coefficients suivants dans le modèle représentent les divers mécanismes qui déterminent la façon dont l'eau liquide est transportée :

Coefficient de conduction du liquide :

$$D_{l,\varphi} = p_{sat} \delta_{air} \left(\frac{1}{\mu^*(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (3)$$

Où δ_{air} est la perméabilité à la vapeur de l'air stagnant, μ est le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur dans une tasse sèche et μ^* est le facteur de diffusion de la vapeur dans une humidité plus élevée.

Coefficient de transport capillaire pour le processus d'aspiration :

$$D_{l,ws} = \left(3.8 \left(\frac{a}{w_f} \right)^2 1000^{\frac{w}{w_f}-1} \right) \xi_\varphi \quad (4)$$

Où a est le coefficient d'absorption de l'eau liquide, w_f est la teneur en eau de saturation et ξ_φ est la capacité de sorption.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Réponse de la paroi aux variations cycliques de température - scénario 1

Le mur a été exposé aux conditions météorologiques générées par la chambre climatique pour analyser son comportement sous des fluctuations réelles. Le premier scénario simule une canicule estivale, avec des températures diurnes atteignant 40°C (12 heures) et des températures nocturnes descendant à 20°C (12 heures). Avant chaque modification de scénario, la paroi a été stabilisée à 20°C et 55 % HR des deux côtés. Les cycles ont été répétés sur sept jours pour assurer la cohérence des résultats. La **Figure 3** illustre l'évolution de la température dans le mur à différentes profondeurs. Les résultats confirment un comportement cohérent sur sept jours, seuls trois cycles sont présentés dans le graphe. Pendant les phases de refroidissement et de chauffage, des gradients de température ont été observés entre les faces extérieure et intérieure du mur. Bien que la température extérieure ait atteint 40°C, la surface extérieure du mur a enregistré un maximum de 36°C. Inversement, pendant la phase de refroidissement à 20°C, la face extérieure a rapidement atteint cette température et s'y est stabilisée. Tous les capteurs ont enregistré une température de 20°C pendant la phase de refroidissement, alors qu'un écart de température de 6°C a été détecté

entre 2,5 cm et 7,5 cm pendant la phase de chauffage. Cela suggère que le mur réagit plus rapidement au refroidissement qu'au chauffage. Cette réponse est cohérente sur l'ensemble des cycles, soulignant le comportement distinct du mur pendant le chauffage et le refroidissement.

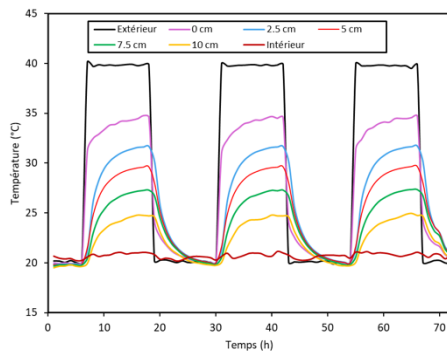


Figure 3. Réponse thermique de la paroi BTC sous des variations cycliques de température entre 20°C et 40°C.

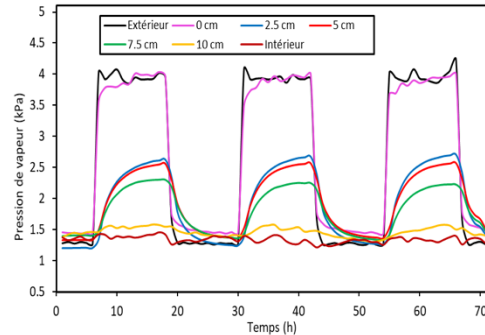


Figure 4. Variation de la pression de vapeur à l'intérieur du mur durant les cycles de température.

Alors que l'humidité a été maintenue constante sur les faces du mur, les fluctuations de température ont induit des variations de HR à travers sa profondeur, soulignant le phénomène couplé de transfert de chaleur et de masse dans le mur en BTC. La **Figure 4** présente la variation de la pression de vapeur en fonction de la profondeur du mur au cours des cycles de température. On observe que les capteurs situés sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi sont directement influencés par les sollicitations thermiques. Les capteurs ont enregistré une tendance similaire pour la pression de vapeur et pour les variations de température. La pression de vapeur atteint 1,2 kPa pour toutes les profondeurs lorsque le mur est refroidi à 20 °C. En revanche, toutes les profondeurs n'ont pas atteint la pression maximale de 2,6 kPa, où un écart de 11,5 % est observé entre les profondeurs de 2,5 cm et 7,5 cm. Au milieu du mur (5 cm), la pression de vapeur a été plus affectée par les sollicitations externes. Néanmoins, un écart maximal de 21,5 % HR a été mesuré au niveau de la paroi extérieure du mur (0 cm), correspondant à une différence de température de 14,9°C. L'écart minimal se situe au milieu de la paroi, avec une valeur de 4,2 % HR associée à une variation de 9,9°C. Ces variations en fonction des cycles de température mettent en évidence l'effet du transfert thermique sur le transfert de masse dans la paroi en BTC, où les variations thermiques ont engendré des fluctuations d'humidité. Ce phénomène a été mis en évidence par Djongyang *et al.* (Djongyang *et al.*, 2009) qui ont montré que le niveau de l'humidité relative s'élève avec l'augmentation de la température dans un bâtiment à matériaux poreux. Ce comportement s'explique par l'effet combiné de la conduction et de la diffusion de la vapeur. Belarbi *et al.* (Belarbi *et al.*, 2024) ont également rapporté que, lorsque l'air humide rencontre des surfaces plus froides dans un bâtiment en torchis, un processus de condensation se produit, libérant de la chaleur latente qui réchauffe l'environnement intérieur. À l'inverse, par temps chaud, l'évaporation de l'eau provenant des surfaces internes peut avoir un effet de refroidissement naturel. Cela explique ce qui se passe à l'intérieur du mur en BTC lorsque l'augmentation de la température entraîne une légère évaporation de l'humidité contenue dans le matériau.

B. Réponse de la paroi de terre durant des cycles d'humidité- scénario 2

Le deuxième scénario évalue la réponse hygrique du mur aux variations d'HR. Pendant l'essai, la température extérieure est restée stable à 20°C, tandis que l'HR extérieure a alterné entre 80 %

(pendant 20 jours) et 20 % (pendant 20 autres jours). Plusieurs cycles ont été effectués pour garantir la répétabilité des résultats. L'HR intérieure a fluctué entre 30 et 50 % en raison de l'influence de l'environnement du laboratoire et de la climatisation.

La **Figure 5** illustre l'évolution de l'HR dans le mur au fil du temps et à différentes profondeurs. L'HR générée par la chambre climatique ne correspond pas exactement aux valeurs enregistrées sur la face extérieure (0 cm) qui sont systématiquement plus élevées. Cette différence peut être attribuée à la condensation sur la face extérieure du mur qui affecte le capteur collé à la surface de la paroi.

Un gradient HR a été observé sur l'ensemble du mur, mais aucun des capteurs n'a atteint une valeur d'équilibre stable. Le capteur situé à 2,5 cm de profondeur a enregistré l'HR la plus élevée, soit 68 %. Cependant, aucun point de saturation de la pression de vapeur n'a été observé, ce qui indique que le mur a besoin de plus de temps pour atteindre la saturation totale. Lorsque l'HR extérieure est passée à 80 %, la face extérieure du mur a réagi rapidement. Dans le même temps, les capteurs situés à 2,5 cm et 5 cm ont présenté une réponse tardive, probablement due à la saturation de la vapeur dans les pores. A 7,5 cm de profondeur, la réponse du mur a été davantage influencée par les fluctuations HR, bien que l'humidité extérieure ait encore un effet notable. La réponse plus lente du mur aux changements hygriques par rapport au transfert de chaleur met en évidence la vitesse plus lente du transfert de l'humidité. Ceci est mis en évidence par la réaction retardée observée à des profondeurs plus importantes, contrairement aux changements rapides enregistrés sur la face extérieure.

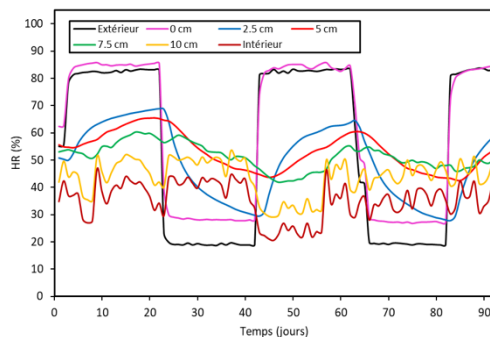


Figure 5. Réponse de la paroi aux variations cycliques d'humidité – 80 % - 20 % HR.

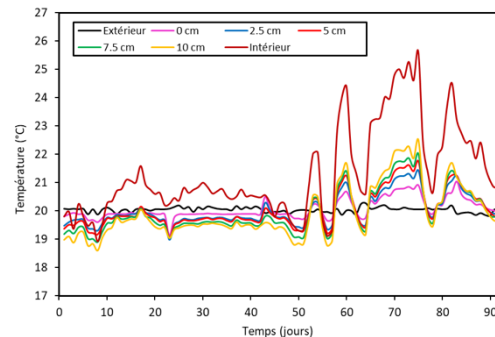


Figure 6. Evolution de la température à l'intérieur de la paroi durant les cycles HR.

La **Figure 6** illustre l'évolution de la température à l'intérieur de la paroi durant les cycles HR. Les résultats montrent que la température extérieure stabilisée à 20 °C demeure constante. En revanche, la température intérieure de la paroi a subi des fluctuations dues aux variations à l'intérieur du laboratoire. Cette dernière atteint 26 °C vers la fin des essais. On remarque également que cette augmentation n'a pas affecté la réponse du mur en humidité, où les deux cycles enregistrés présentent une bonne répétabilité (voir **Figure 5**). Durant le premier cycle, la température est restée quasi stable. Un gradient de température est apparu au cours du deuxième cycle, entraînant un transfert de chaleur à l'intérieur de la paroi. Après 20 jours à 80 % HR, on constate que la température ne s'est pas stabilisée.

C. Modèle numérique - prédiction du comportement de la paroi

La **Figure 7** montre les résultats issus des simulations numériques et des mesures expérimentales pour les sollicitations de température sur le mur de BTC. L'analyse se concentre sur le comportement du mur à des profondeurs de capteurs de 2,5 cm, 5 cm et 7,5 cm. Les résultats

indiquent que le modèle utilisé s'aligne bien avec les données expérimentales, même si les simulations numériques surestiment légèrement la réponse du mur lorsque la température augmente de 20°C à 40°C. L'écart le plus important observé est de 4,4 % à une profondeur de 2,5 cm. Toutefois, ces différences relatives mineures entre les résultats numériques et les mesures pourraient s'expliquer par la précision des capteurs (qui peut aller jusqu'à 5 %) ou par des incertitudes sur leurs positions. Par ailleurs, certaines hypothèses n'ont pas été prises en compte dans le modèle numérique et peuvent également contribuer à cet écart. De plus, les paramètres d'entrée du modèle considérés comme connus car issus des mesures peuvent également engendrer des biais. Néanmoins, cet écart entre les mesures et les simulations reste tout à fait acceptable et montre que le modèle numérique utilisé semble fiable pour prédire le comportement du mur lors de futures sollicitations thermiques. Boukhelf *et al.* (Boukhelf *et al.*, 2022) ont observé des tendances similaires lorsqu'ils ont évalué le comportement hygrothermique expérimental et numérique d'un mur composé d'éco-béton fabriqué avec de la poudre de verre. Les écarts ont été attribués à des problèmes de calcul numérique (choix du maillage, sélection du solveur) ainsi qu'aux incertitudes de mesure, telles que les erreurs de capteur et les changements dans les propriétés des matériaux au cours de l'expérience.

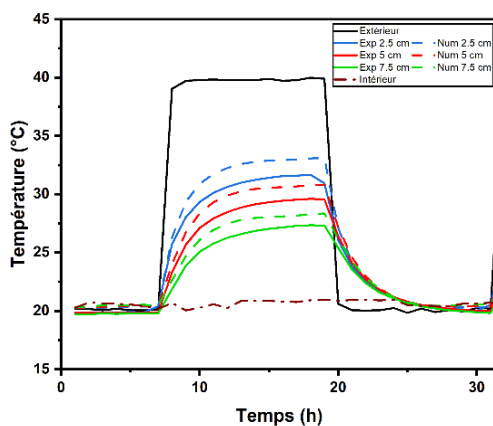


Figure 7. Résultats numériques et expérimentaux des températures internes à la paroi pendant un cycle de température.

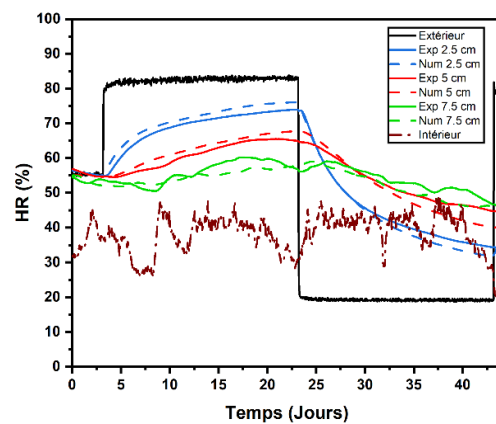


Figure 8. Profils d'humidité numériques et expérimentaux à l'intérieur d'un cycle d'humidité du mur BTC.

La **Figure 8** illustre la réponse expérimentale et numérique du mur à des variations de l'HR pour une température constante de 20°C. Les observations indiquent que la simulation numérique surestime la réponse du mur avec une différence maximale de 4,1 % à une profondeur de 7,5 cm. Comme pour le cas du transfert thermique, plusieurs facteurs peuvent expliquer la surestimation des données expérimentales par le modèle (incertitudes des paramètres d'entrée du modèle, position des capteurs, ...). De plus, le fait que dans l'isotherme de sorption le phénomène d'hystérésis ne soit pas pris en considération peut également expliquer cet écart. Néanmoins, nous pouvons avancer que dans ce cas également, le modèle numérique utilisé dans cette étude fournit des prédictions très acceptables pour l'estimation de l'HR à différentes profondeurs du mur de BTC. Cao *et al.* (Cao *et al.*, 2021) ont étudié l'influence des conditions intérieures sur le transfert de chaleur et de masse dans les structures d'enveloppe, montrant que la climatisation (comme dans notre cas) affecte le transfert d'humidité et modifie les propriétés de surface du mur et sa réponse à l'humidité. Les propriétés d'humidité varient considérablement entre les matériaux, comme les différences entre les propriétés du mortier et celles des BTC. Cependant, la prédiction d'une humidité plus élevée par le modèle est considérée comme plus sûre pour les

applications en ingénierie. De même, Dong *et al.* (Dong *et al.*, 2020) ont observé des tendances similaires pour les mesures de l'HR dans le cas d'un milieu poreux. L'écart entre les données numériques et expérimentales semble être plus marqué pour l'humidité relative que pour les cycles de température. Cette différence a été attribuée à la faible précision des capteurs. De plus, les propriétés des matériaux utilisés dans les modèles de Dong *et al.* diffèrent de celles mesurées expérimentalement. Un autre facteur est que les modèles ne reflètent pas pleinement le processus non linéaire du transfert de chaleur et de masse couplé dans la plage d'humidité. La climatisation dans le laboratoire peut également affecter de manière significative le transfert d'humidité à l'intérieur du mur. D'après les études de la littérature présentées, nous pouvons une fois de plus conclure que le modèle numérique utilisé dans notre étude fournit une estimation fiable du transfert d'humidité pour différentes profondeurs du mur en BTC.

IV. CONCLUSION

Cette étude analyse le comportement thermique et hygrique d'une paroi en BTC afin d'évaluer sa capacité à assurer un confort intérieur sans recours à des systèmes de régulation. Un mur en BTC a été soumis à des variations de cycles de température et d'humidité dans un environnement bi-climatique. Les résultats montrent que le mur régule efficacement la chaleur, avec un transfert plus rapide lors du refroidissement que du chauffage. Un couplage entre les transferts de chaleur et de vapeur est observé. Les cycles d'humidité influencent également la répartition de l'humidité dans le mur, confirmant l'existence d'un transfert couplé de chaleur/masse dans la terre crue.

Le modèle numérique utilisé a permis de prédire la réponse thermique et hygrique du mur en BTC avec une légère surestimation des résultats (4,4 % pour la température et 4,1 % pour l'humidité relative). Ces écarts peuvent être dus à certaines incertitudes et limitations du modèle. Néanmoins, les résultats issus de la simulation restent globalement satisfaisants. Des études complémentaires à l'échelle du bâtiment sont en cours, ainsi que le développement d'un revêtement protecteur et biosourcés compatible avec les aléas climatiques pour des murs en BTC.

REFERENCES

- Alioua, T., Agoudjil, B., Boudenne, A., Benzarti, K., 2021. Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall. *Building and Environment* 202, 108019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108019>
- Alioua, T., Agoudjil, B., Chennouf, N., Boudenne, A., Benzarti, K., 2019. Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect. *Building and Environment* 163, 106333. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106333>
- Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W., 2015. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings* 104, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>
- Asli, M., 2017. Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux bio-sourcés: approches numérique et expérimentale (Thèse de doctorat). Université d'Artois, 1991-...., France.
- Bart, M., Moissette, S., Ait Oumeziane, Y., Lanos, C., 2014. Transient hygrothermal modelling of coated hemp-concrete walls. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 18, 927–944. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.911122>
- Belarbi, Y.E., Ferroukhi, M.Y., Issaadi, N., Poullain, P., Bonnet, S., 2024. Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale. *Energy and Buildings* 310, 114119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114119>

- Boukhelf, F., Trabelsi, A., Belarbi, R., Bachir Bouiadjra, M., 2022. Experimental and numerical modelling of hygrothermal transfer: Application on building energy performance. *Energy and Buildings* 254, 111633. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111633>
- Cao, S., Li, X., Yang, B., 2021. Heat and moisture transfer of building envelopes under dynamic and steady-state operation mode of indoor air conditioning. *Journal of Building Engineering* 44, 102683. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102683>
- Cehade, S., Sidi-Boulenouar, R., Dujardin, N., Maillet, B., Mertz, J.-D., Giovannacci, D., Keita, E., Melinge, Y., Boudenne, A., 2024. Experimental Investigation of Hygrothermal Properties of Raw Earth Compressed Blocks, in: Beckett, C., Bras, A., Fabbri, A., Keita, E., Perlot, C., Perrot, A. (Eds.), *Second RILEM International Conference on Earthen Construction*, RILEM Bookseries. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 428–437. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_44
- Djongyang, N., Tchinda, R., Njomo, D., 2009. A study of coupled heat and mass transfer across a porous building component in intertropical conditions. *Energy and Buildings* 41, 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.009>
- Dong, W., Chen, Y., Bao, Y., Fang, A., 2020. A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. *Journal of Building Engineering* 32, 101484. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101484>
- Dujardin, N., Feuillet, V., Allam, H., Gourlay, E., Nasser, H., Chakir, R., Koenen, A., Boussaba, L., Zibouche, K., Waeytens, J., 2024. From biobased & geosourced materials to building hygrothermal transfers: A review of modeling, simulation and experiment. *Journal of Building Engineering* 98, 110979. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110979>
- Giuffrida, G., Ibos, L., Boudenne, A., Allam, H., 2024. Analysis of the thermal performances of uninsulated and bio-based insulated compressed earth blocks walls: from the material to the wall scale. *Journal of Building Engineering* 90, 109370. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109370>
- Hema, C., Messan, A., Lawane, A., Soro, D., Nshimiyimana, P., van Moeseke, G., 2021. Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation. *Journal of Building Engineering* 38, 102148. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102148>
- Hema, C., Messan, A., Lawane, A., Van Moeseke, G., 2020. Impact of the Design of Walls Made of Compressed Earth Blocks on the Thermal Comfort of Housing in Hot Climate. *Buildings* 10, 157. <https://doi.org/10.3390/buildings10090157>
- Künzel, H.M., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag, Stuttgart.
- Maalouf, C., Le, A.D.T., Umurigirwa, S.B., Lachi, M., Douzane, O., 2014. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy and Buildings* 77, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., Shea, A., 2014. Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment* 75, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
- Mendes, N., Winkelmann, F.C., Lamberts, R., Philippi, P.C., 2003. Moisture effects on conduction loads. *Energy and Buildings* 35, 631–644. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00171-8)